

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

屋内測位システム IMES の
インフラ化に関する研究

Study on IMES as a Positioning Infrastructure

申 請 者

藤井	健二郎
Kenjiro	FUJII

2016 年 5 月

米国の測位衛星システムである GPS の誕生により、地上設置型のほとんどの電波航法システムは GPS (Global Positioning System) に取って代わられた。システム上、同期をとるために衛星に搭載された原子時計は、地上側の原子時計と協調し、世界時間を生成する重要な要素になった。地球上の絶対位置の特定だけでなく、絶対時間をも知ることができるシステムであることから、GPS は屋外測位インフラとして定着した。近年では他国の測位衛星システムと連携し、GNSS (Global Navigation Satellite Systems) を構成することで、測位精度や測位サービス利用エリアの向上・拡大がなされている。その応用先は、カーナビから測量、見守り、位置ベース広告、通信機器やコンピュータシステムの同期など多岐に渡っており、我々の生活に必要な不可欠なものになっている。

屋外測位分野の発展に応じて、屋内測位の研究も盛んになされるようになった。無線 LAN や UWB (超広帯域無線) などの電波や赤外線、超音波、カメラ画像など、多様な観測値を用い、三辺測量・三角測量、フィンガープリンティング、イメージマッチなど様々な測位手法が提案されてきた。しかしながら、デファクトスタンダードないしインフラとして確立された技術・手法は未だ存在しないと言っている。

こうした状況の中、本研究では、屋外において既に GPS/GNSS がインフラ化していることを踏まえ、GPS 互換電波を用いた屋内測位に注目する。GPS 互換電波を発信する送信機が屋内に設置されれば、同一の受信機 (チップ) を用いて屋内外をシームレスに測位可能になるという利点がある。実際に我が国においては、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) を中心とした産学官のコンソーシアムによって、GPS 互換の屋内送信機である IMES (Indoor Messaging System) の仕様を策定し、GPS と連携した屋内外シームレス測位インフラ構築の準備が整いつつある。送受信機メーカー各社も製品の販売を開始している。このように、既に事業化がなされている IMES であるが、これから実際に IMES を屋内インフラとして成立させるには、いくつかの条件を満足させる必要がある。

本研究で考えるインフラ化の条件とは、①送信機位置の保証、②測位の安定化、③設置・運用の容易化、④用途の拡大、および⑤測位の高精度化である。①に関しては JAXA によりネットワークを用いた送信機認証という形で確立されつつあるが、②～⑤に関しては、これまで十分な検討が進められてきたとは言い難い。

そこで本研究の目的を次のように定める。IMES を屋内測位インフラにするための要件 (上記②～⑤) に対し、その実現方法を提案し、それを実験的に評価すること。そして、各手法の制約条件を明らかにし、今後の実用化開発および実運用に資する知見を得ること。

まず、直近の事業化を見据えた研究として、上記②③④を実現するための研究を行う。これらの研究は非常に幅が広いものであるため、日立グループにおいて IMES の事業化を進める上で見えてきた課題に限定し、その解決方法を提案する。

特に送信機メーカーとして、電波送信技術の確立を目指して研究を実施する。

次に将来の事業化を見据えた研究として、⑤の要件に対応する高精度化の研究を実施する。IMES 受信機で取得可能な観測値である、搬送波ノイズ比、ドップラー変化、および搬送波位相を用い、物品管理等に使用できるサブメートルレベルの測位から、ロボットのナビゲーションにも使用可能なセンチメートルレベルの測位精度を達成することを目指す。高精度化の方法は複数存在するため、それらを網羅的に取り上げ、それぞれの利点と欠点を明確にし、達成可能な測位精度や実装における制約を明らかにする。

本論文は 7 章で構成した。まず第 1 章では、測位や地図の歴史と GPS/GNSS が屋外測位インフラに至るまでの経緯を述べた。そして、多数提案されている屋内測位手法を俯瞰する中で、GPS 互換電波を用いた屋内測位手法であるスードライトと IMES の位置付けを説明した。本研究は早稲田大学 WABOT-HOUSE 研究所において、屋内スードライトを常設することから始まったため、その研究成果についても述べた。そして、スードライトの経験に基づき IMES が提案されるに至った経緯と、それをインフラ化するために必要な条件について述べ、本研究の目的を明確にした。

第 2 章では、電波送信技術の確立と題し、上述したインフラ化要件のうち、測位の安定化、設置・運用の容易化、および用途の拡大を目指し、標準的な IMES の電波送信手法を拡張した方法を提案した。まず測位の安定化に関しては、電波干渉によって発生した不感帯の影響を低減するため、送信チャンネルを冗長化する送信ダイバーシティ方式を提案した。評価実験の結果は、各チャンネルからの電波の不感帯の発生位置が異なることで、常に少なくとも一つの電波を取得できることを確認した。設置・運用の容易化に関しては、環境に応じた物理アンテナの交換コストを低減するという視点から、電氣的にビーム幅を変えることができる可変ビーム幅アンテナおよびデュアルビーム幅アンテナを提案し、それが想定通り機能することを確認した。そして、用途の拡大に関しては、単位時間あたりの移動距離が大きい高速移動体への対応として、漏洩同軸ケーブルを IMES のアンテナとして用いることを提案し、実験により、ケーブルの長さを延長することで移動体の測位に対して有効に機能することを示した。

第 3～6 章においては、IMES の高精度化について述べた。第 3 章では、一般的な受信機が電波の取得状態を示す値として出力する搬送波ノイズ比を測位に活用することで、IMES の高精度化を実現した。搬送波ノイズ比は電波強度に類似する指標であり、送受信機間の距離が大きくなるにつれて減少することから、電波伝搬モデルを構築した。それを用いることで、送受信機間の距離を求め、GPS 同様の三辺測量を用いて受信機の位置を計算することを可能とした。ロボットに本手法を適用する実験と、歩行者に適用する実験を行い、ロボットの実験においては、カルマンフィルタを用いて三辺測量とデッドレコニングの利点を活用するこ

とで、デシメートルレベルの測位を実現した。一方、歩行者による実験では、三辺測量の性能が低く、カルマンフィルタを用いた場合でもメートル以下の測位精度にとどまった。この原因として、人体が送受信機間に入った際に電波の減衰を引き起こしているとの仮説を立て、追加実験によってそれを明らかにした。

第4章では、受信アンテナを動かすことでIMES送信機からの搬送波にドップラー変化を生成し、それにより測位を行う「ドップラー測位」手法を提案した。そして、位置だけでなく、方位も同時に推定する「ドップラー位置方位推定」手法および、それをリアルタイムかつ受信機プラットフォームが移動しながら行うことができるように改良した「RTK ドップラー位置方位推定」手法も併せて提案した。本章全体を通して実施した実験により、ドップラー測位によってセンチメートルからデシメートルレベルの測位精度を達成可能であることが示された。ドップラー測位に使用される受信機は機械要素(回転駆動機構)を用いているため、ロボットとの親和性が高い方法と言える。

第5章では、受信機を改良した前章とは異なり、送信機側を改良し、近接配置アンテナアレイから送信される搬送波を用いた双曲線測位を提案した。まず、基礎的な2次元測位の方法論とその評価実験について述べ、それらを3次元測位に拡張する方法に関して説明した。これらの手法の測位性能を評価した結果、幅はあるがセンチメートルからメートルレベルの測位結果が得られることが確認できた。この幅を生み出している主な原因はアンテナの電磁気学的な位相中心変動と考えられ、これを低減することが今後の課題として残った。本章で紹介する手法は、既存の受信機が使用できることから、ロボットに対してだけでなく、人に対するサービスにも用いることができると言える。

第6章では、IMESの高精度化手法を発展させ、スードライトによる搬送波測位を実現することを試みた。屋内GPSの歴史としては、高精度測位が可能なスードライトの実現困難性が確認されたことから、より低精度で簡易なIMESに移行してきた経緯がある。スードライトの実現困難性の最たる原因は、整数不定性の決定(送受信機間の波の数をカウントすること)であるが、本章では、第4章で紹介したドップラー測位と第5章で紹介した搬送波双曲線測位を組み合わせることで、この解決を目指した。実際にシステムを構築し、実験を行った結果、センチメートルレベルの測位を実現した。

第7章においては、本研究についてまとめると同時に、将来の展望を提示した。本研究はIMESの可能性を網羅的に探究したものであり、ここで明らかになった知見が、今後の実用化開発や実運用におけるガイドラインの役割を果たすことができることを述べた。特に高精度化手法は多岐に渡るため、測位精度、システムの簡便さ、利点・欠点、応用先等で比較・整理し、今後の開発の道標を作成した。将来の展望としては、本論文で紹介した各種手法を組み合わせることの提案や、運用規則策定の必要性について述べた。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 藤井 健二郎 印

(2016 年 7 月 7 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p>A Combined Approach of Doppler and Carrier-based Hyperbolic Positioning with a Multi-channel GPS-pseudolite for Indoor Localization of Robots, Indoor Positioning and Indoor Navigation Conference (IPIN2016), Oct. 2016, Kenjiro Fujii, Ryosuke Yonezawa, Yoshihiro Sakamoto, Alexander Schmitz, and Shigeki Sugano（採録決定）</p> <p>Electrically Small Shorted Patch Antenna Array with Switchable Radiation Patterns for Indoor Messaging System, IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems, Mar. 2016, Hisanori Matsumoto, Makoto Tanikawara, Kenjiro Fujii, and Tomohisa Kohiyama</p> <p>○ Improving IMES Localization Accuracy by Integrating Dead Reckoning Information, Sensors 2016, 16(2), Jan. 2016, Kenjiro Fujii, Hiroaki Arie, Wei Wang, Yuto Kaneko, Yoshihiro Sakamoto, Alexander Schmitz, and Shigeki Sugano</p> <p>○ Methods for improving IMES transmitters: Transmission diversity, variable beamwidth antenna, and leaky coaxial cable, 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Dec. 2015, Kenjiro Fujii, Takamasa Kawaguchi, Hisanori Matsumoto, Makoto Tanikawara, Takashi Toyama, Yoshihiro Sakamoto, Wei Wang, Hiroaki Arie, Alexander Schmitz, and Shigeki Sugano</p> <p>○ Hyperbolic Positioning with Antenna Arrays and Multi-Channel Pseudolite for Indoor Localization, Sensors 2015, 15(10), Sep. 2015, Kenjiro Fujii, Yoshihiro Sakamoto, Wei Wang, Hiroaki Arie, Alexander Schmitz, and Shigeki Sugano</p> <p>○ Accurate indoor positioning using IMES radio, 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Aug. 2015, Kenjiro Fujii, Wei Wang, Yuto Kaneko, Yoshihiro Sakamoto, Hiroaki Arie, and Shigeki Sugano</p> <p>Doppler pose estimation using multiple IMES transmitters for indoor localization, Journal of Location Based Services, Feb. 2014, Yoshihiro Sakamoto, Takuji Ebinuma, Kenjiro Fujii, and Shigeki Sugano</p> <p>Hyperbolic Positioning with Proximate Multi-channel Pseudolite for Indoor Localization, IGNSS Symposium 2013, July, 2013, Yoshihiro Sakamoto, Hiroaki Arie, Takuji Ebinuma, Kenjiro Fujii, and Shigeki Sugano</p> <p>Real-time Kinematic Doppler Pose Estimation for IMES, 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July, 2013, Yoshihiro Sakamoto, Takuji Ebinuma, Kenjiro Fujii, and Shigeki Sugano</p> <p>Doppler Positioning with a Movable Receiver Antenna for High-Accuracy IMES Localization, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Sep. 2012, Yoshihiro Sakamoto, Kenri Kodaka, Takuji Ebinuma, Kenjiro Fujii, and Shigeki Sugano</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p>Indoor Positioning based on Difference between Carrier-phases Transmitted from Proximately-located Antennas of a Multi-channel Pseudolite, <i>Proc. of International Conference on Innovative Engineering (ICIES2012)</i>, Dec. 2012, Yoshihiro Sakamoto, Yui Totoki, Takuji Ebinuma, Kenjiro Fujii, and Shigeki Sugano</p> <p>Doppler Positioning with Orientation Estimation by Using Multiple Transmitters for High-accuracy IMES Localization, <i>Proc. of 2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN2012)</i>, Nov. 2012, Yoshihiro Sakamoto, Takuji Ebinuma, Kenjiro Fujii, and Shigeki Sugano</p> <p>Active-localization methods for mobile robots in a coarsely structured environment with floor-embedded RFID tags and indoor GPS, <i>Proc. of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA2012)</i>, Aug. 2012, Yoshihiro Sakamoto, Kenri Kodaka, Takuji Ebinuma, Kenjiro Fujii, and Shigeki Sugano</p> <p>GPS-compatible Indoor-positioning Methods for Indoor-outdoor Seamless Robot Navigation, <i>Proc. of 2012 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO2012)</i>, May. 2012, Yoshihiro Sakamoto, Takuji Ebinuma, Kenjiro Fujii, and Shigeki Sugano</p> <p>Real-time Indoor Positioning with a Single IMES Transmitter and a Rotation-type Doppler Measurement Unit, <i>Proc. of International Global Navigation Satellite Systems (IGNSS) 2011 (incorporating the International Symposium on GPS and GNSS)</i>, Nov. 2011, Yoshihiro Sakamoto, Takuji Ebinuma, Kenjiro Fujii, and Shigeki Sugano</p> <p>High-accuracy IMES localization using a movable receiver antenna and a three-axis attitude sensor, <i>Proc. of 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN2011)</i>, Sep. 2011, Yoshihiro Sakamoto, Hiroaki Arie, Takuji Ebinuma, Kenjiro Fujii, and Shigeki Sugano</p> <p>Doppler Positioning with a Movable Receiver Antenna and a Single Pseudolite for Indoor Localization, <i>Proc. of 2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2011)</i>, Jul. 2011, Yoshihiro Sakamoto, Hiroaki Arie, Takuji Ebinuma, Kenjiro Fujii, and Shigeki Sugano</p> <p>Multiplexing Receivers to Improve Positioning Success Rate for Pseudolite Indoor Localization, <i>Proc. of the 7th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA10)</i>, Apr. 2010, Yoshihiro Sakamoto, Haruhiko Niwa, Takuji Ebinuma, Kenjiro Fujii, and Shigeki Sugano</p> <p>GPS-based Indoor Positioning system with Multi-Channel Pseudolite, <i>Proc. of IEEE-RAS International Conference on Robots and Automation (ICRA 2008)</i>, May 2008, Haruhiko Niwa, Kenri Kodaka, Yoshihiro Sakamoto, Masaumi Otake, Seiji Kawaguchi, Kenjiro Fujii, Yuki Kanemori, and Shigeki Sugano</p> <p>仮想基準局方式を用いた高精度位置インフラへのアプローチ, 日本航海学会誌 NAVIGATION, Mar. 2003, 河口星也、笹野耕治、藤井健二郎、近藤雅信、羽田久一、植原啓介</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p>実機システムへの適用による FA セル制御言語の評価, 電気学会論文誌 C, Mar. 2003, 小山昌宏, 三宅徳久, 藤井健二郎, 薦田憲久</p> <p>FA セル制御言語プログラムの高速実行方法, 電気学会論文誌 C, Jun. 2002, 小山昌宏, 三宅徳久, 藤井健二郎, 薦田憲久</p> <p>Factory-automation-Cell Control Language based on Petri nets and its application to a real-life system, Proc. of IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 1999, KOYAMA M, MIYAKE N, and FUJII K</p> <p>GPS と内界センサを用いた起伏地における移動機の位置計測, 計測自動制御学会論文集, Aug. 1999, 青野俊宏, 藤井健二郎, 初本慎太郎</p> <p>起伏地における移動機の位置計測, 日本ロボット学会誌, Jul. 1998, 青野俊宏, 藤井健二郎, 初本慎太郎, 神谷敬之</p>
解説記事	<p>ディファレンシャル GPS と内界センサを用いた移動機の位置推定, 計測自動制御学会論文集, Apr. 1998, 青野俊宏, 藤井健二郎, 初本慎太郎, 神谷敬之</p> <p>次世代都市 地理空間情報の活用による人と環境に配慮した都市づくり, 日立評論, Vol.92 Issue 11, Nov. 2011, 富田仁志, 前田遭, 升山義弘, 下垣豊, 藤井健二郎</p> <p>環境情報構造化の GPS--WABOT-HOUSE 研究所 室内 GPS への取組, ロボット / 日本ロボット工業会 編 (特集 環境情報構造化), Mar. 2008, 藤井 健二郎</p> <p>It's a Robot Life, GPS World, Sep. 2007, Shigeki Sugano, Yoshihiro Sakamoto, Kenjiro Fujii, Ivan G. Petrovski, Makoto Ishii, Kazuki Okano, and Seiya Kawaguchi</p>
講演	<p>地域情報トータルソリューションによる新たな価値の創造 循環型地域社会への転換を促進する環境情報システム, 日立評論, Jun. 2002, 増田亮太, 藤井健二郎, 竹沢康德</p> <p>ロボットのための電波伝搬モデルを用いた IMES 測位の精度向上に関する研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, May 2015, 金子雄人, 汪偉, 坂本義弘, 有江浩明, 藤井健二郎, 菅野重樹,</p> <p>IMES の搬送波・ノイズ比を用いた電波伝搬モデルによる人やロボットのための屋内高精度測位, 平成 27 年度測位航法学会全国大会, Apr. 2015, 金子雄人, 汪偉, 坂本義弘, 有江浩明, 藤井健二郎, 菅野重樹</p> <p>IMES 環境下での屋内ロボットの移動システムに関する研究, 平成 26 年度測位航法学会全国大会, Apr. 2014, 米澤遼亮, 十時惟, 坂本義弘, 川口貴正, 海老沼拓史, 藤井健二郎, 菅野重樹</p> <p>他, 講演 22 件</p>